

Untersuchungen an wärmebehandelten TiAl6V4-Proben und Auslegung eines isothermen Schmiedewerkzeuges.

Bernd-Arno Behrens¹, Timur Yilkiran¹, Andreas Klassen¹, Klaus Kosch¹,
Helmut Brand², Mike Schulze¹, Tobias Prüß^{1*}

¹Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

²IFW - Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe; Remscheid

*Korrespondenzautor:

Dipl.-Ing. Tobias Prüß

Bereich Massivumformung

Tel: 0511-762 4106, Fax: 0511-762 3007

pruess@ifum.uni-hannover.de

Titan ist ein Leichtbauwerkstoff der neben allen anderen Fertigungsverfahren auch die Massivumformung vor Herausforderungen stellt. So ist beim konventionellen Schmieden die Auskühlung der Randschicht nachteilig für das Gefüge, die mechanischen Eigenschaften der Bauteile und das Formänderungsvermögen. Das Isothermschmieden hebt diese Nachteile auf. Die thermischen Randbedingungen des Prozesses führen zu Eigenschaftsänderungen des Umformgutes. In diesem Artikel werden Untersuchungen zur Kornvergrößerung, Härteentwicklung in der Randschicht und des temperaturabhängigen Phasenübergangs des Kristallgitters vorgestellt. Die Erkenntnisse der Temperaturführung sollen in den isothermen Schmiedeprozess eines Gelenkkreuzes übertragen werden. Hierzu werden die Ergebnisse der numerischen Abschätzungen des Fließverhaltens und der Formfüllung dargestellt.

Schlüsselwörter: Isothermschmieden, Massivumformung, Titanlegierung, Induktive Rohteilerwärmung

www.utfscience.de IV/2014:

Behrens, et al.: Untersuchungen an wärmebehandelten TiAl6V4-Proben und Auslegung eines isothermen Schmiedewerkzeuges S.1/12

Verlag Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Str. 7a, 96047 Bamberg, www.umformtechnik.net

Isothermschmieden als innovatives Schmiedeverfahren

Die klassischen Umformverfahren wie z.B. das Freiformschmieden oder das Gesenkschmieden wurden in den letzten Jahrzehnten durch technologische und wirtschaftliche Herausforderungen um Spezialverfahren der Massivumformung ergänzt. So wurde das Gesenkschmieden zum Präzisionsschmieden [1] weiterentwickelt sowie eine hohe Materialausnutzung und große Formänderungen durch die pulvermetallurgische Werkzeugherstellung [2] und das Thixoforming [3] ermöglicht. Zur Warmmassivumformung von hochwarmfesten Legierungen hat sich in den letzten Jahrzehnten das alternative Schmiedeverfahren des Isothermschmiedens etabliert. Es wird insbesondere bei Werkstoffen angewendet, die eine empfindliche Temperaturabhängigkeit bezogen auf ihr Umformvermögen haben, wie zum Beispiel Titan und seine Legierungen sowie Nickelbasislegierungen [4].

Der Unterschied des Isothermschmiedens zum konventionellen Gesenkschmieden kann am Beispiel des Titans besonders gut erläutert werden, da dieser Werkstoff eine Gittermodifikation von einem kubisch raumzentrierten Gitter (krz, α -Modifikation) zum hexagonal dichtest gepackten Gitter (hdp, β -Modifikation) aufweist. Bei Reintitan liegt die β -Transus-Temperatur bei 882 °C und nimmt höhere Werte je nach Legierung an. Die Massivumformung von Titanlegierungen wird je nach Temperaturbereich in α/β -Schmieden und β -Schmieden unterteilt. Beim α/β -Schmieden wird ein Temperaturbereich zwischen 30 K und 100 K unterhalb des β -Transus angestrebt. Diese hohe Temperatur ermöglicht ein hohes rissfreies Formänderungsvermögen sowie geringe Umformkräfte während des Schmiedens. Die Einhaltung dieser engen Temperaturtoleranzen ist notwendig, denn durch die Einbringung von Umformenergie kann es zu einer Erwärmung des Schmiedestückes über den β -Transus hinaus kommen, was eine Überhitzung des Gefüges zur Folge haben kann. Durch die Wahl von geeigneten Umformgeschwindigkeiten und Formänderungen ist ein globulares Gefüge der α -Phase erzielbar. Die Abkühlung von Schmiede- auf Raumtemperatur kann an Luft erfolgen [5].

Um die Vorteile einer verbesserten Plastizität und geringeren Umformkraft zu nutzen, wird beim β -Schmieden das Umformgut über den β -Transus erwärmt. Die Umformung erfolgt bevor die Temperatur durch ein Unterschreiten der β -Transus-Temperatur eine Transformation von β - zu α -Gefüge erzwingt. Die Bauteilzone, die während des β -Schmiedevorganges unter den β -Transus fällt wird „Die-Chill-Zone“ genannt (nach: engl. „Die“ = „Gesenk“). Durch zeitlich kritische Umwandlungsvorgänge kann es zu ungünstigen Gefügebildungen kommen. Diese Zone muss im nachfolgenden Bearbeitungsschritt meistens spanend entfernt werden [5]. Die Die-Chill-Zone beeinflusst das Fließverhalten insofern, dass das Material von der erkalteten Zone wegfließt, bzw. nicht nachfließt [7]. Nach [7] ist es in einem mehrstufigen Prozess möglich, oberhalb der β -Transus-Temperatur zu Schmieden,

www.utfscience.de IV/2014:

Behrens, et al.: Untersuchungen an wärmebehandelten TiAl6V4-Proben und Auslegung eines isothermen Schmiedewerkzeuges S.2/12

Verlag Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Str. 7a, 96047 Bamberg, www.umformtechnik.net

wenn der letzte Umformschritt unterhalb dieser Temperatur stattfindet, um die gewünschte Gefügestruktur zu erzielen.

Beim konventionellen Titanschmieden kann es insbesondere bei dünnwandigen Querschnitten aufgrund des kühleren Gesenks zu Temperaturverlusten im Schmiedestück von bis zu 150 °C kommen. Um den Temperaturverlust durch eine kurze Druckberührzeit so gering wie möglich zu halten, werden relativ hohe Formänderungsgeschwindigkeiten im Bereich von $\dot{\varphi} = 10^1 - 10^3 \text{ s}^{-1}$ angewendet. Dies führt jedoch zu einem erheblichen Anstieg der Fließspannung und damit zu einer hohen Umformkraft.

Beim Isothermschmieden besitzen sowohl das Gesenk als auch das Werkstück die gleiche Temperatur. Die Beheizung des Gesenks erfolgt meistens induktiv (Abbildung 1). Hierdurch ist es möglich mit wesentlich langsameren Formänderungsgeschwindigkeiten von $\dot{\varphi} = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ und damit im Bereich niedriger Fließspannungen zu arbeiten. Bei optimaler Abstimmung von Umformtemperatur und Formänderungsgeschwindigkeit verringert sich die erforderliche Umformkraft für das Isothermschmieden auf 1/5 bis 1/10 der konventionellen Umformkraft. Das verbesserte Fließverhalten von Titanlegierungen beim Isothermschmieden bietet sich für die Herstellung dünnwandiger Teile mit nur geringer oder keiner Bearbeitungszugabe an [8]. Die langsame Umformung ermöglicht zusätzlich die Ausnutzung des superplastischen Effektes, bei dem durch sehr langsames Umformen extrem große Umformgrade erreicht werden können.

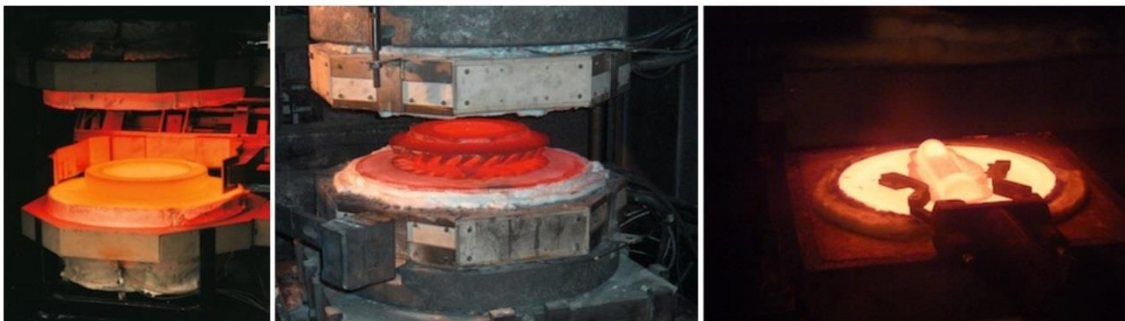


Abbildung 1 Isothermschmieden in der industriellen Anwendung [9]

Als Gesenkwerkstoff für dieses Schmiedepinzip haben sich vor allem Nickelbasislegierungen und Molybdänlegierungen als vorteilhaft erwiesen. Bei Verwendung von Gesenken aus Nickelbasislegierungen kann das Isothermschmieden aufgrund der Oxidationsbeständigkeit des Werkstoffs an Luft durchgeführt werden. Dagegen muss beim Einsatz von Gesenken aus Molybdänlegierungen aufgrund seiner hohen Affinität zu Sauerstoff das Isothermschmieden unter Vakuum oder inerten

Atmosphäre vorgenommen werden. Dies erfordert eine weitaus aufwändigere Prozessvorbereitung und -durchführung. Durch die Reduzierung der Umformkraft sowie die Herstellung endkonturnaher Bauteile durch eine Erhöhung des Formänderungsvermögens von Titan, führt das Isothermschmieden zu einer Kostenreduzierung von rund 30 % gegenüber dem konventionellen Schmieden (Abbildung 2). Ausschlaggebend dafür sind eine gute Werkstoffausnutzung sowie eine geringere Nachbearbeitungszeit nach dem Schmiedeprozess [10].

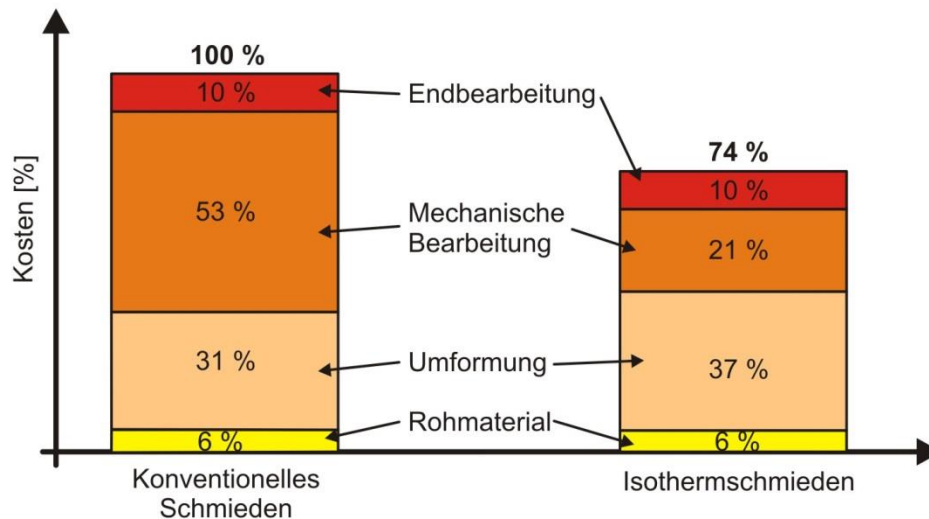


Abbildung 2 Kostenvergleich zwischen konventionellen und isothermen Schmieden [10]

Die mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe lassen sich durch eine gezielte Wärmebehandlung beeinflussen. Hierbei werden je nach Material und Zielsetzung unterschiedliche Temperaturen, Haltezeiten und Abkühlrouten kombiniert. Insbesondere bei Titanbauteilen hat die vorherige Wärmebehandlung einen großen Einfluss auf die Qualität der Bauteile. So sind vor der Auslegung eines isothermen Schmiedeprozesses die Auswirkungen von Erwärmung, Haltezeit und Abschreckung des Bauteils auf das erzielbare Gefüge und dessen mechanische Eigenschaften, die Randschichtdicke und -härte und das Kornwachstum durchzuführen.

Untersuchung der Randschichtversprödung

Aus der Literatur ist bekannt, dass Titanlegierungen eine hohe Affinität zu Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff aufweisen [5]. Deswegen werden Titanschmiedeprozesse oft unter einer Schutzgasatmosphäre durchgeführt, deren Verwirklichung einen erheblichen verfahrenstechnischen Aufwand darstellt [6]. Zur Vermeidung dieses Aufwandes ist zu untersuchen, in welchem Maße eine

Erwärmung der Proben unter Luftatmosphäre durchgeführt werden kann, ohne eine zu starke Versprödung der Randschicht zu erzielen.

Der Einfluss der Aufheiz- und Haltezeit auf die Randschichtversprödung wurde durch eine Versuchsreihe ermittelt. Hierzu wurden Proben auf die Temperatur von 1000 °C aufgeheizt und unterschiedlich langen Haltezeiten ausgesetzt (Abbildung 3). Um instationäre Effekte bei der Aufheizung zu vermeiden und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden alle Wärmebehandlungen in vorgeheizten Laboröfen durchgeführt. Die Wärmebehandlung wurde durch eine Wasser- bzw. Luftabkühlung beendet.

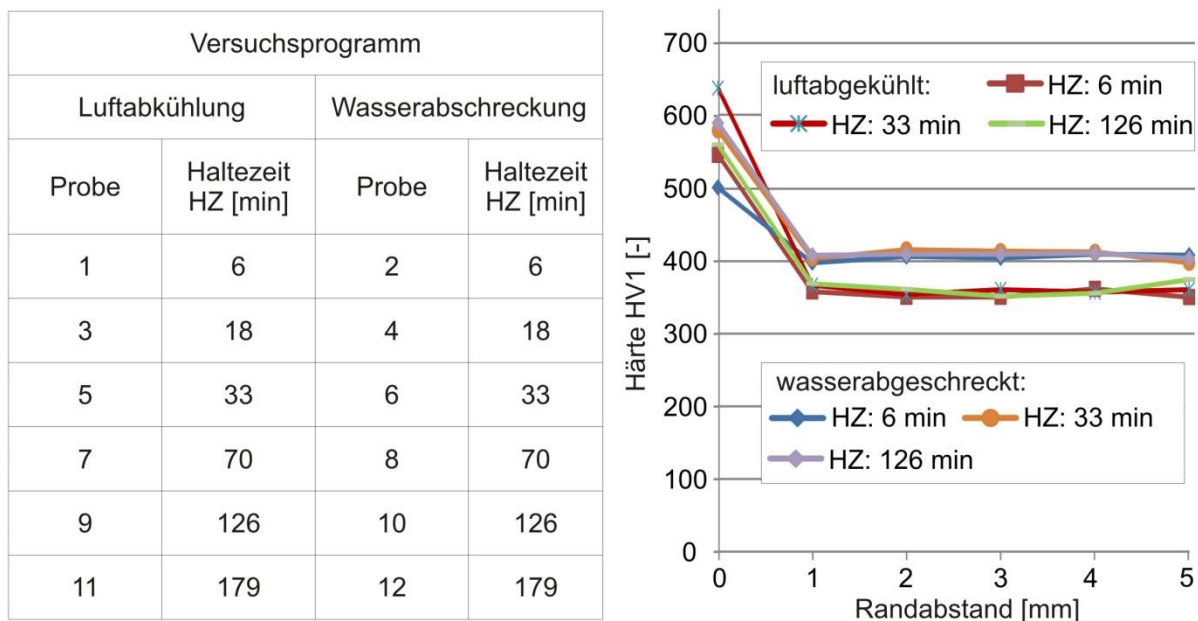


Abbildung 3 Versuchsprogramm und Auswertung

Um die Randschichtversprödung in Höhe und Eindringtiefe zu ermitteln, wurden die Haltezeiten von 6 Minuten bis 179 Minuten variiert. Sie wurden gewählt, um den Bereich der schmiedetypischen Aufheizzeiten abzubilden.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Härteverläufe dargestellt. Zur Aufnahme der Härtewerte wurde das Vickersverfahren nach DIN EN ISO 6507 angewendet. Die Härtewerte nahe der Oberfläche steigen um ca. 100 % und fallen auf den Ausgangswert von ca. 300 HV1 ab einem Randabstand von 1 mm. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss auf die Härte der unterschiedlichen Abkühlrouten der Proben. Es ergibt sich für die an Luft abgekühlten Proben ein durchschnittlicher Härtewert von ca. 400 HV1, während bei den wasserabgeschreckten Proben Werte im Bereich von ca. 340 HV1 entstehen. Dieses Ergebnis der Härtewerte stimmt mit den in der Literatur vorhandenen Werten überein [11]. Zusammenfassend kann

festgestellt werden, dass die Abkühlroute einen weit höheren Einfluss auf die Härte der Randschicht hat, als die Haltezeit allein. Der Einfluss der Haltezeit auf die Eindringtiefe ist als sehr gering zu bewerten.

Kornwachstum durch Wärmebehandlung

Die Bedingungen für Superplastizität sind grundlegend in [12] beschrieben. So sind ein feinkörniges Gefüge im Bereich weniger Mikrometer, eine Umformtemperatur ($T_U \geq 0,5 \cdot T_S$) und eine geringe Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ notwendig. Für das superplastische Fließen von Titanlegierungen beträgt die notwendige Korngröße ca. 10 μm . So sind sehr hohe plastische Dehnungen durch Korngrenzengleiten, Kornrotation sowie Korngrenzendiffusion erzielbar [5]. Der Forderung nach einem feinkörnigen Gefüge steht gegenüber, dass metallische Körner bei erhöhten Temperaturen wachsen. Dies ist insbesondere bei einer langen Halte- bzw. Erwärmungszeit der Fall. Es gilt also zu untersuchen welchen Einfluss eine Wärmebehandlung auf die erzielbare Korngröße hat. Hierzu wurden unterschiedlich wärmebehandelte Proben metallografisch untersucht und ein Linienraster in Anlehnung an DIN EN ISO 643 angelegt.

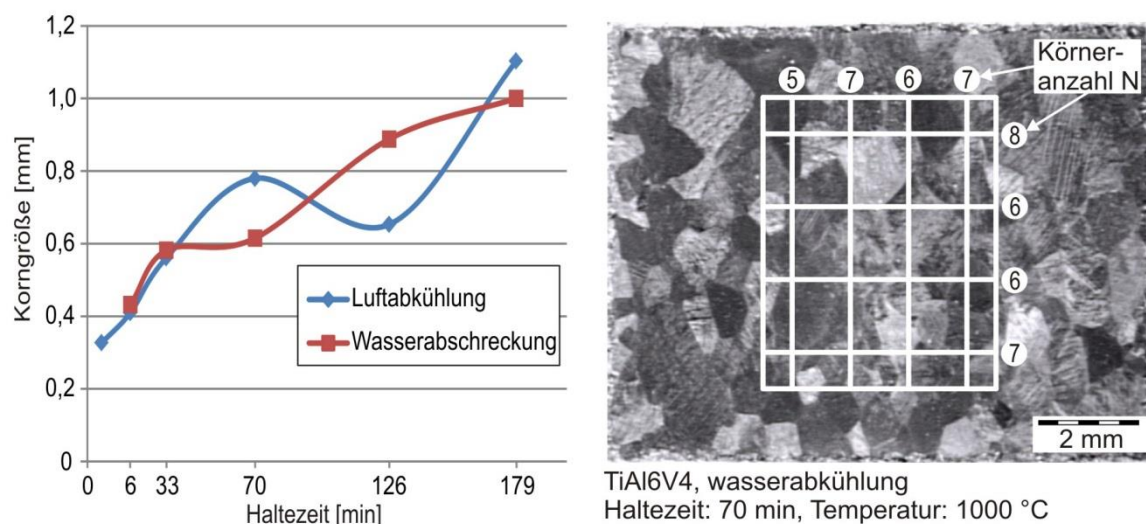


Abbildung 4 Korngröße in Anhängigkeit der Haltezeit

Die mittlere Korngröße d_m wird durch den Quotienten der gesamten Linienlänge L_s bezogen auf die Anzahl N der geschnittenen Körner gebildet.

$$d_m = \frac{L_s}{N} \quad (\text{Gl.2})$$

Beispielhaft ist in Abbildung 4, rechts die Auswertung einer wasserabgeschreckte Probe nach einer Haltezeit von 70 Minuten dargestellt. Die Gesamtlinielänge L_s beträgt 32 mm, die Körneranzahl N 52. Somit ergibt sich eine Korngröße von $d_m = 0,615$ mm. Nach Abbildung 4, links ist ersichtlich, dass die Körner selbst bei der

kürzesten Haltezeit von 6 Minuten auf eine Größe von ca. 0,3 bis 0,4 mm anwachsen. Dies ist ein vielfacher Wert der für die superplastische Umformung notwendigen Kornfeinheit. Die Erwärmung von Titanrohteilen in einem Umluftofen ist deswegen zur superplastischen Umformung nicht geeignet.

Mechanische Eigenschaften wärmebehandelter Proben

Anschließend wurden Wärmebehandlungsversuche durchgeführt, die einen Zusammenhang zwischen Korngrößenwachstum und den mechanischen Eigenschaften herstellen. Die Wärmebehandlung erfolgte in einem vorgeheizten Laborofen bei einer Temperatur von 950 °C. Die Proben wurden nach Ablauf der Haltezeiten (15 Min, 30 Min und 45 Min) entnommen und den unterschiedlichen Abkühlrouten einer Luftabkühlung bzw. Wasserabschreckung ausgesetzt. Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften werden die Kerbschlagbiegearbeit des Kerbschlagversuches sowie die Kennwerte des Zugversuches herangezogen.

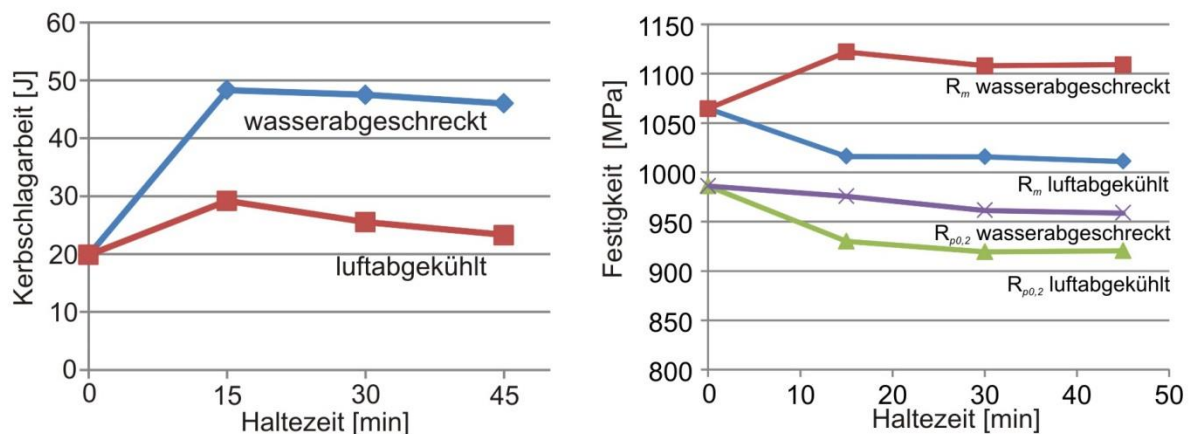


Abbildung 5 Mechanische Kennwerte

In Abbildung 5, links sind die Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuchs dargestellt. Durch die Kombination der Wärmebehandlung mit der Wasserabschreckung ergeben sich Kerbschlagarbeiten, die den 2,5-fachen Wert des Ausgangsmaterials erreichen. Die Werte der luftabgekühlten Proben steigen nur leicht. Die Haltezeit hat einen weit geringeren Einfluss auf die Kerbschlagarbeit als die Art der Wärmebehandlung.

Bei den Zugversuchen hingegen führte die Wasserabschreckung zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit R_m und gleichzeitigen Absenkung der Dehngrenze $R_{p0,2}$. Die Umformbarkeit der Legierung wird hierdurch erweitert. Ausgehend von einem Streckgrenzenverhältnis der unbehandelten Proben von 0,92 ergab sich bei den wasserabgeschreckten Proben ein Verhältnis von 0,87. Die Dauer der Haltezeit hat nur einen minimalen Einfluss. Die luftabgekühlten Proben weisen ein Streckgrenzenverhältnis von 0,91 auf. Somit ist bei den wasserabgeschreckten

Proben eine höhere Umformbarkeit gegeben. Die Kerbschlagproben wurden anschließend metallografisch untersucht (Abbildung 6).

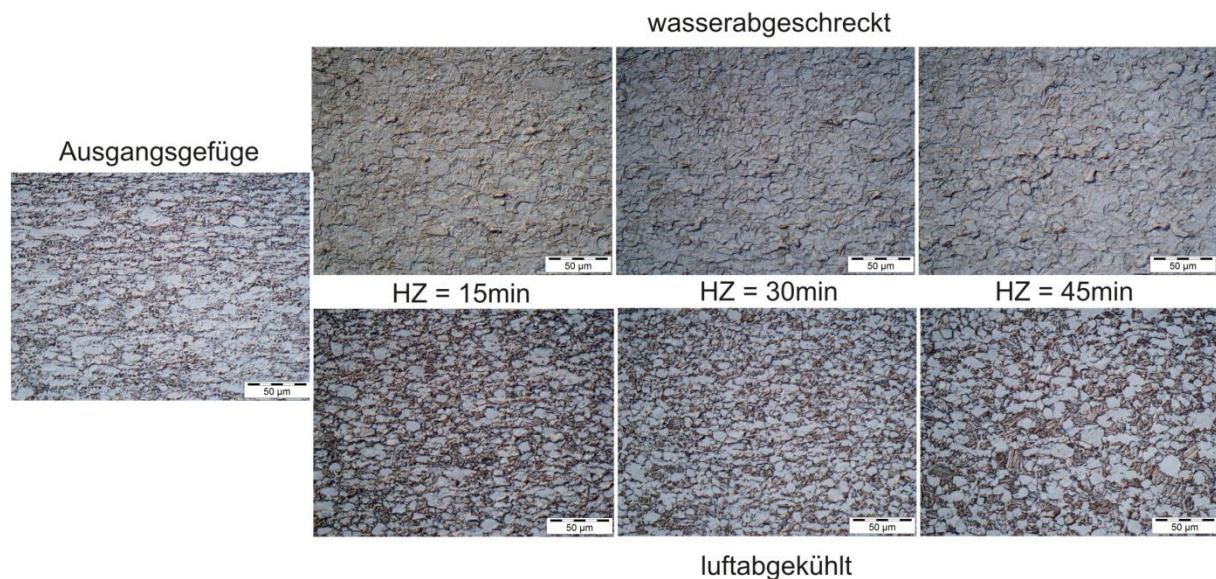


Abbildung 6 Lichtmikroskopische Untersuchung der Kerbschlagproben

Wie die mechanischen Kennwerte schon erwarten lassen, sind Unterschiede zwischen den Wärmebehandlungsarten ersichtlich, nicht jedoch zwischen den Haltezeiten. Die luftabgekühlten Proben bilden ein globulares Gefüge aus, in dem die hellen α -Körner gut sichtbar sind. Sie sind eingelagert in einer transformierten β -Matrix und enthalten nadelige β -Lamellen. Eine Veränderung der Korngrößen kann nicht beobachtet werden. Die wasserabgeschreckten Proben enthalten ebenfalls eine globulare Körnung. Das leicht zeilige Ausgangsgefüge wurde durch beide Wärmebehandlungsmaßnahmen aufgelöst.

Ermittlung der β -Transus-Temperatur

Die β -Transus-Temperatur von Reintitan liegt bei 882 °C. Bei Titanlegierungen verschiebt sie sich. Für die hier untersuchte Legierung TiAl6V4 liegen in der Literatur unterschiedliche Werte vor. Diese reichen von 975 °C bis 995 °C [13]. Brill et al. stellen thermophysikalische Möglichkeiten der Ermittlung von temperaturbedingten Gitterveränderungen dar. Ein Verfahren beruht auf der Messung von Längenänderungen des Probenmaterials während der Erwärmung [13].

Hier wird zur Ermittlung des β -Transus das Abschreck- und Umformdilatometer DIL 805A/D+T der Firma Bähr-Thermoanalyse GmbH herangezogen. Die Proben (\varnothing 5 mm, Höhe 10 mm) wurden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/s auf eine Temperatur von 1000 °C erwärmt. Die Haltezeit betrug 10 Sekunden bei $T = 1000$ °C. Die Abkühlrate betrug ebenfalls 5 K/s.

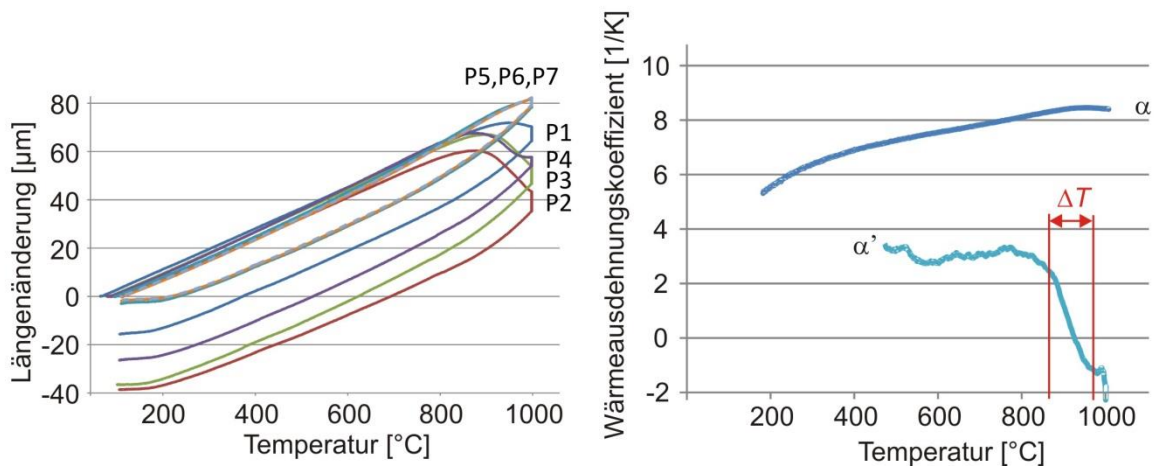


Abbildung 7 Längenänderung (links); Wärmeausdehnung (rechts)

In (Abbildung 7) sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Links sind die Längenänderungen der untersuchten Proben abgebildet. Man erkennt leichte Steigungsänderungen bei den Temperaturen $T = 800 \text{ °C}$ und $T = 950 \text{ °C}$.

Da die leichten Steigungsänderungen noch keine eindeutige Aussage über das Umklappen der Kristallgitter erlauben, wurde zusätzlich zum Wärmeausdehnungskoeffizient α die Steigung α' ermittelt (Abbildung 7, rechts) und in stark überzeichneter Form dargestellt. Ab einer Temperatur von 850 °C fällt die Steigung stark ab, sodass hier von einem beginnenden Umklappen des Gitters ausgegangen werden kann. Dieser Steigungsverlauf hält bis zu einer Temperatur von ca. 980 °C an. Die Gittertransformation geschieht also nicht schlagartig, sondern vollzieht sich in einem Temperaturintervall von $\Delta T = 130 \text{ °C}$.

Auslegung eines isothermen Schmiedeprozesses

Anhand der Voruntersuchungen können die Randbedingungen für einen isothermen Schmiedeprozess Laboruntersuchungen von Titanlegierungen festgelegt werden: Um ein möglichst geringes Kornwachstum zu erreichen, ist eine schnelle Erwärmung mittels induktiver Erwärmung zu wählen. Zur Vermeidung von ungünstigen Abschreckeffekten ist die Umformtemperatur weit genug unterhalb von β -Transus zu wählen.

Die Bauteilgeometrie wird für nachfolgende werkstoffkundliche Untersuchungen (Zugversuche, Kerbschlagbiegeversuche) so gestaltet, dass eine einfache Probenentnahme im Anschluss an die Umformversuche gewährleistet ist. Das in Abbildung 8 dargestellte Gelenkkreuz weist Abmaße auf, die die Entnahme von normgerechten Zug- und Kerbschlagbiegeproben zulassen.

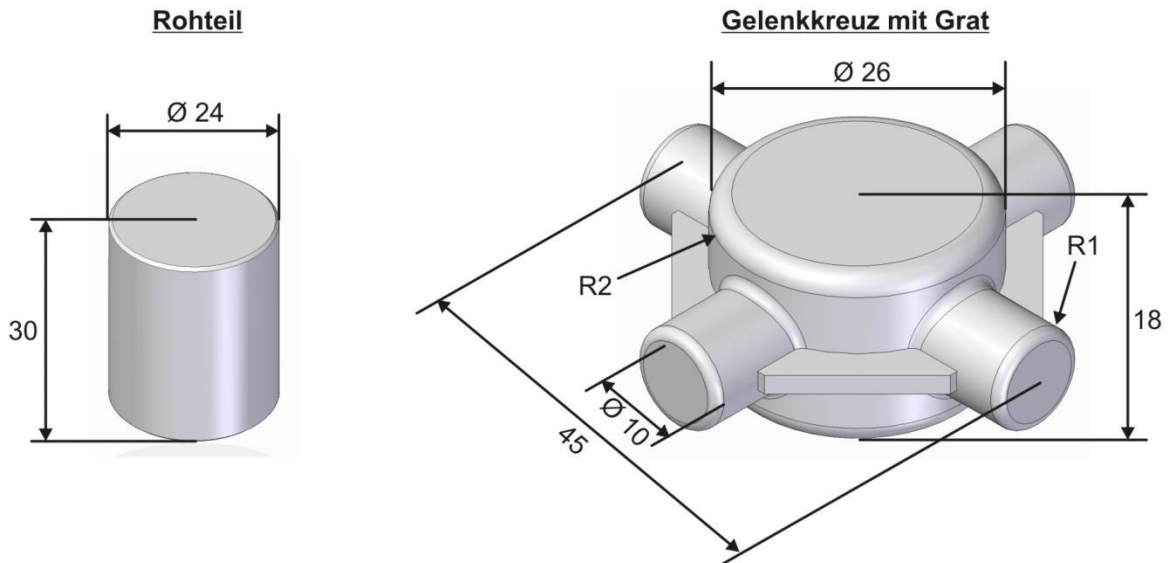


Abbildung 8 Gelenkkreuz zum Isothermschmieden

Zusätzlich zur Formfüllung der Gesenke muss auch die Umformbarkeit des Werkstücks geprüft werden. Hierzu wurde mit Hilfe des FEM-Programms Forge (Transvalor) eine reine Stoffflusssimulation mit einer starren Werkzeugmodellierung durchgeführt. In Abbildung 9 sind die erzielbaren Umformgrade dargestellt. Die höchsten Umformgrade sind im Grat zu erwarten. Auch die Umformgrade am Zapfenansatz und im Steg weisen hohe Werte auf. Bei einer späteren Untersuchung des Schmiedeergebnisses ist in diesen Bereichen auf eine hohe Oberflächengüte zu achten. Es ist zu prüfen, ob die Oberfläche durch Anrisse oder Faltenbildung beschädigt ist.

In einem nächsten Auslegungsschritt ist eine vollständige Werkzeuganalyse durchzuführen. Hierin wird ermittelt welche mechanischen Beanspruchungen am Gesenk auftreten, damit ein geeigneter Werkzeugwerkstoff ausgewählt werden kann. Ebenso ist zu prüfen, ob die Herstellung des Bauteils in einer Stufe durchgeführt werden kann, oder ob hierzu ein mehrstufiger Prozess mit Zwischenschritten notwendig ist.

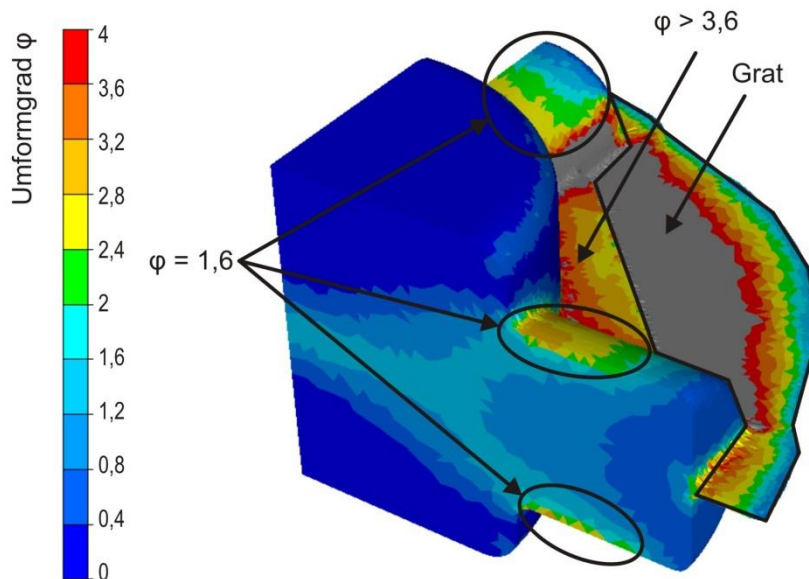


Abbildung 9 Berechnung des Umformgrad

Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Ergebnisse dienen der Gestaltung eines isothermen Schmiedeprozesses von Titanlegierungen. So werden nach der Verfahrensvorstellung des Isothermschmiedens die Einflüsse einer Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften, des Kornwachstums und der Randschichtversprödung vorgestellt. Daneben wird der Phasenübergang vom kubisch raumzentrierten Gitter auf das hexagonal dichtest gepackten Gitter ermittelt.

Diese Informationen werden zur Gestaltung eines isothermen Schmiedeprozesses verwendet. Als zu schmiedendes Bauteil wird ein Gelenkkreuz herangezogen. Zur Abschätzung der Fließwege wurde eine Stoffflusssimulation mittels FE-Methoden durchgeführt.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Grundlagenprojektes „Keramische Werkzeugwerkstoffe zum Isothermschmieden von Titanlegierungen“ (Be 1691/67-1).

Literatur

- [1] **Behrens, B.-A.; Brauckmann, C.; Kosch, K.; Prüß, T.; Yilkiran, T.:** „Präzisionsschmieden von Verzahnungen“. FVA-Fertigungskolloquium 2012, Karlsruhe, 2012
- [2] **Behrens, B.-A.; Vahed, N.; Brand, H.:** „Pulvermetallurgische Herstellung gradierter Werkzeugwerkstoffe“, Online Magazin UTF-Science,

Meisenbach-Verlag, I/2014

- [3] **Behrens, B.-A.; Frischkorn, C.:** „*Induktive Erwärmung von partikelverstärkten Stahlpresslingen in den thixotropen Temperaturbereich*“, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 45, Issue 3, S. 177–186; 2014
- [4] **Janschek, P.:** "Entwicklung einer Schmiedetechnologie zur Herstellung von Verdichterschaukeln aus Gamma-Titanaluminid", Schmiede Journal, Seite 22-23, September 1999
- [5] **Peters, M; Leyens, P.:** „Titan und Titanlegierungen“, Wiley-VCH Verlag, Köln, 2002
- [6] **Gessinger, G. H.:** „Isothermes Umformen“, Zeitschriftenaufsatz Fertigung Band 9 Heft 4, Seite 108, Bern, 1978
- [7] **Scanlan, J.V.; Chambers, G.J.G:** “Forgings in Titanium Alloys, The Science Technology and Application of Titanium”, Pergamon Press, p 79–95, 1970
- [8] **Schröder, G.:** "Isothermes und superplastisches Umformen beim Gesenkschmieden", Werkstatt und Betrieb Band 113, Seite 765-770, 1980
- [9] **Leistritz Turbinentechnik GmbH:** „www.turbinentechnik.com/luftfahrt/technologie/isothermschmieden.html“, Remscheid, 2014
- [10] **Heisig, E.:** „Auch für Kleinserien, Isothermes Schmieden im Net-shape-Verfahren“, Schweizer Maschinenmarkt, 1995
- [11] **Datenblatt TiAl6V4;** ThyssenKrupp Materials Schweiz; www.thyssenkrupp.ch, 2014
- [12] **Lange, K.:** „Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion“, Springer, Berlin, 1993
- [13] **Adam, P.:** „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Springer Basel AG, Basel 1998
- [14] **Brill, U.; Runiewicz, A.; Mess, D.:** „Thermophysikalische Bestimmungsmöglichkeiten der α/β - Transus- Temperatur von TiAl6V4-Legierungen“, Konstruktion: Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur- Werkstoffe; 2013

www.utfscience.de IV/2014:

Behrens, et al.: Untersuchungen an wärmebehandelten TiAl6V4-Proben und Auslegung eines isothermen Schmiedewerkzeuges S.12/12

Verlag Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Str. 7a, 96047 Bamberg, www.umformtechnik.net